

电工与电气设备

广东建筑工程学校
内蒙建筑学校 合编



中等专业学校试用教材

中国建筑工业出版社

前 言

本书为中等专业学校建筑机械专业《电工与电气设备》的教学用书，其他专业和有关人员也可参考。

在1975~1976年间，曾由北京建筑工程学校、山东建筑工程学校、南京建筑工程学校、四川建筑工程学校、内蒙建筑学校、广东建筑工程学校协作编写了一本油印讲义，本书是在该讲义的基础上，根据1978年5月在西安召开的中等专业学校建筑机械专业教材编写会议所拟定的教学大纲，由广东建筑工程学校、内蒙建筑学校重新修编而成。

本书稿曾由福建建筑工程学校审阅过。

本书1~3章由内蒙建校贾秉西同志编写；4~7章由广东建校雷滋法同志编写；8章由广东建校徐志强同志编写。

由于编者水平有限，缺点和错误在所难免，请提出批评指正。

编 者

一九七八年十一月

目 录

第一章 直流电路	1
第一节 电场	1
第二节 直流电路	3
第三节 复杂电路的计算	10
第四节 电功、电功率及电流的热效应	15
第五节 电容与电容器	17
习题一	20
第二章 电与磁	22
第一节 磁场	22
第二节 磁介质、磁化	24
第三节 磁路与安培环路定律	25
第四节 磁场对载流导体的作用	27
第五节 电磁感应	28
第六节 自感、互感及涡流	29
习题二	33
第三章 交流电路	35
第一节 单相交流电	35
第二节 单相交流电路	40
第三节 提高功率因数的意义及方法	49
第四节 三相交流电	51
第五节 三相负载	54
第六节 输电与配电	60
习题三	62
第四章 变压器	65
第一节 概述	65
第二节 单相变压器	65
第三节 三相变压器	67
第四节 特殊用途变压器	70
习题四	73
第五章 三相异步电动机	74
第一节 三相异步电动机的结构和接线方法	74
第二节 三相异步电动机的工作原理和机械特性	76
第三节 鼠笼式异步电动机的起动和反转	82
第四节 绕线式异步电动机的起动和调速	85
第五节 绕线式异步电动机起动电阻的计算	88
第六节 异步电动机的制动	90

第七节 三相异步电动机的选用	91
第八节 电动机的电源线和熔丝的选择	95
第九节 单相异步电动机	96
第十节 同步电机	98
习题五	99
第六章 直流电机和汽车电气设备	100
第一节 直流电机的构造、分类和特性	100
第二节 直流电动机的作用原理、机械特性、起动和调速	104
第三节 发电机—电动机系统	107
第四节 汽车电气设备	108
第五节 调节器	110
第六节 汽车用直流电动机	114
第七节 全车电气设备线路	117
习题六	123
第七章 低压电器和控制电路	125
第一节 开关设备	125
第二节 熔断器	134
第三节 接触器与按钮	138
第四节 继电器	148
第五节 磁力起动器	153
第六节 凸轮控制器	154
第七节 限位开关	158
第八节 制动用电气设备	159
第九节 常用建筑机械电气设备控制电路图	162
第十节 建筑机械电力驱动的基本知识	171
第十一节 安全用电	178
习题七	181
第八章 电子技术及其应用	188
第一节 半导体的特点	188
第二节 二极管	191
第三节 二极管整流电路	195
第四节 三极管	200
第五节 三极管放大电路	204
第六节 反馈与反馈放大电路	210
第七节 晶体管开关电路	215
第八节 稳压电路	221
第九节 硅整流发电机及电压调节器	227
第十节 可控硅	231
第十一节 半导体器件的型号和测试	241
习题八	246

第一章 直 流 电 路

随着生产和科学的高速度发展，电工技术在现代农业、现代工业、现代国防和现代科学技术方面的应用愈来愈广泛。特别是电子技术在自动控制、精密测量和电子计算机等部门的应用，使电工技术在四个现代化中占有重要的地位。因此，从事工程技术的人员必须具有一定的电工知识和必要的电工理论，以便能正确地选择和使用生产上常见的电气设备。

第一节 电 场

一、电场强度

我们知道，自然界中一般物质都是由电子、质子和中子等基本粒子所组成。质子带正电，中子不带电，质子和中子结合成原子核。电子带负电，在原子核周围按一定的轨道不停地绕原子核运动，犹如行星绕太阳运动一样。

在通常情况下，物体内部的正电荷和负电荷数量相等，物体呈中性即不带电。如果用某种方法如摩擦等，使物体获得电子，物体带负电，使物体失去电子，物体便带正电。

实验证明，同种电荷相互排斥，异种电荷相互吸引。这种电荷之间的相互作用力既不是电荷本身直接接触，又不是通过中间物体间接地进行；而是通过一种特殊的物质来传递的。这种传递电荷相互作用的特殊物质叫做电场。这种特殊的物质，具有物质的属性而又不是由分子和原子所组成。因电荷的相互作用可以在没有分子和原子的真空中进行。

电场是由电荷产生的，它和电荷同时存在同时消失。只要物体带电，在它的周围空间中就会有电场产生，处在电场中的别的电荷就会受到电场力的作用；正象处在地球引力场中的物体一定要受到地球的引力作用一样。凡是引力作用的范围都是引力场；同样凡是电力作用的范围（空间）都是电场。

在地球引力场内不同点上受到地球的吸引力是不同的，在同一点上物体所受到的引力和它的质量成正比。同样道理在电场中某一点上带电体受到电场力的作用和它所带电量成正比。但所带电量不能太大，否则它产生的电场会影响原电场。在不影响原电场的前提下，该电荷在电场中某一点受到的电场力和它所带电量之比是一常数。写成数学表达式有：

$$F = \varepsilon Q \qquad \varepsilon = \frac{F}{Q} \qquad (1-1)$$

ε 叫做某点的电场强度。在数值上等于单位电量所受到的电场力；它的方向与该点正电荷受力的方向相同。在式（1-1）中如果 F 的单位用牛顿， Q 的单位为库仑，那么 电场强度的单位就是牛顿/库仑。

为了形象化，通常用电力线来描绘电场。在绘制电力线时，应使电力线上任一点的切线方向与该点的电场强度的方向相同，并使穿过与电力线垂直的单位面积上的电力线数等

于或正比于该点的电场强度值。这样就可根据电力线的密度和指向直接看出电场的强弱和方向。

如果电场中各点的电场强度相等，即各点上 $\mathcal{E}$ 的大小相等、方向也相同，这样的电场叫做均匀电场。均匀电场可用疏密均匀的平行电力线来表示。如图1-1所示。从图1-1可知

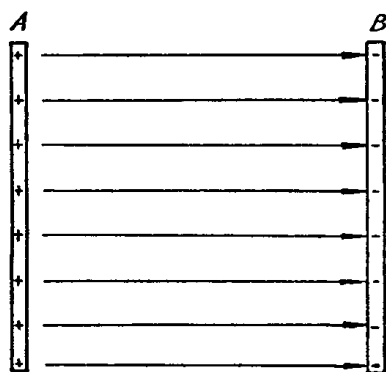


图 1-1 平行板间的电场

电力线的密度和方向在各处都是一样的。如果电力线的密度和方向在不同的位置上是不同的，这样的电场就是非均匀电场。如图1-2所示。

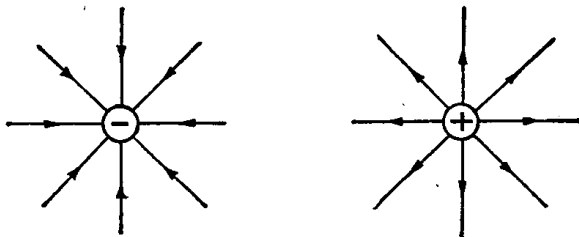


图 1-2 带正电和负电孤立球体的电场

二、电位

物体在地球的引力场中，所处的位置不同具有的重力位能就不同，为此相似，电荷在电场中不同的位置上具有不同的电位能。在地球引力场中物体在地面上的位能为零；在电场中通常也认为和大地相联处电荷的电位能为零。因此电荷在某一点处具有的电位能的大小，就可以用该点移到电位能为零处电场力所做的功来量度。

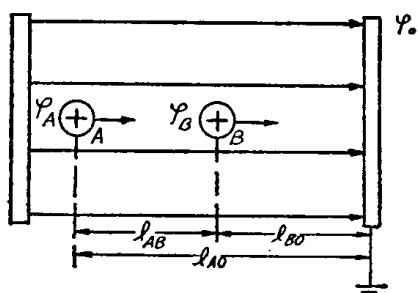


图 1-3 电荷在均匀电场中的电位能

于是在均匀电场中，电荷在A点具有的位能为：

$$W_A = Fl_{A0} = \mathcal{E} Q l_{A0}$$

电荷在B点具有的位能为：

$$W_B = Fl_{B0} = \mathcal{E} Q l_{B0}$$

如图1-3所示。

由此可见电荷在电场中，不同点上具有的电位能是不同的；在同一点上具有的电位能和所带电量成正比，其比值为一常数。写成数学表达式有：

$$W_A = \varphi_A Q \quad \varphi_A = \frac{W_A}{Q} \quad (1-2)$$

l_A 叫做A点的电位。在数值上等于单位电量在该点具有的电位能。在式(1-2)中如果W的单位取焦耳，Q的单位取库仑，那么电位 φ 的单位就是焦耳/库仑，称做伏特，简称伏，用V表示。

电位和水位有某些相似之处。水位有高有低，如某水库的水位比海面高100米（以海面为零），则水库的水位为正100米，比海面低10米则库的水位为负10米；同样道理，电位也有高低正负之分。若某点电位比零电位高，该点电位为正，否则为负。值得指出的是：两点电位同时为正或同时为负时也有高低之分。如图1-4如果规定A板的电位为零，a、b、c各点电位均为负，但a点电位比b点电位高。零电位的点原则上是可以任意指定的。在电子电路中为了便于比较电位高低，视接地点为零；在建筑机械上规定搭铁处（和

车架相接处) 电位为零, 一般情况下视大地的电位为零电位。在带电作业中零电位作业就是使操作者的身体的电位和大地电位相同; 等电位作业就是使操作者身体的电位和某一电

线的电位相同, 在同一电位上的电荷是不会定向移动的。只有两点电位不同时, 正电荷才有可能在电场力的作用下由高电位向低电位移动; 负电荷则由低电位向高电位移动。

三、电压

两点电位之差叫做电压。也叫电位差(电势差)。电压和电位具有相同的单位伏特(简称伏), 除了伏以外还有较大的单位千伏用KV表示, 和较小的单位毫伏用mV表示。

$$1 \text{ 千伏} = 10^3 \text{ 伏}$$

$$1 \text{ 伏} = 10^3 \text{ 毫伏}$$

通常, 电压用 U 来表示。 U_{AB} 表示 A、B 两点间的电位差。即

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B \quad (1-3)$$

由电位的定义从图 1-3 中可以看出:

$$\varphi_A - \varphi_B = \frac{W_A - W_B}{Q} = \frac{Fl_{AB}}{Q} = \frac{\mathcal{E} Q l_{AB}}{Q} = \mathcal{E} l_{AB}$$

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = \mathcal{E} l_{AB}, \quad \mathcal{E} = \frac{U_{AB}}{l_{AB}}$$

上述电压和电场强度关系的公式是在均匀电场中导出的。对于非均匀电场, 可取极小的线段 dl , 在这极小的线段内, 电场可以认为是均匀的, 假设 dU 为 dl 两端的电压, 于是我们有:

$$\mathcal{E} = \frac{dU}{dl}$$

如果考虑电场强度的方向, 还可以写成:

$$\mathcal{E} = -\frac{dU}{dl}$$

负号是表示 $\mathcal{E}$ 的方向为指向电位降低的方向。由此可见, $\mathcal{E}$ 的单位又可用伏/米表示, 它和牛顿/库仑二者是一致的, 读者可自行推证。

第二节 直流电路

一、电流

电路是由电源、负载(用电器)和连接导线所组成。如图 1-5, 电源内部的电路叫做内电路, 导线和负载组成的是外电路。

在电路中, 如果两处的电位不等, 如直流电源的正极和负极, 正电荷就会在电场力的作用下从高电位向低

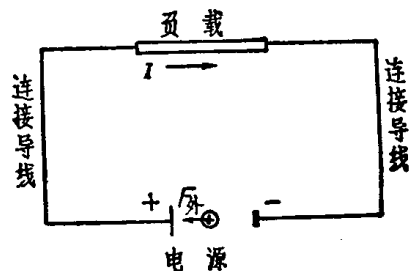


图 1-5 电路的组成

电位移动；负电荷则是由低电位向高电位移动。这样电荷有规律的定向移动就形成了电流。衡量电流大小的量叫做电流强度，简称电流，其定义是：通过导体横截面的电量与通过此电量所需时间之比。用 i 表示，按其定义有：

$$i = \frac{dQ}{dt} \quad (1-4)$$

电流的单位是安培（库仑/秒）用 A 表示，较小的单位有毫安用 mA 表示，1 安培 = 10^3 毫安，较大的单位有千安，1 千安 = 10^3 安培。

电流的方向习惯上规定正电荷流动的方向为电流的方向。如果电流的大小和方向随时间变化，这种电流叫做交流电流，如图 1-6 a 所示。电流的大小随时间变化而方向不变的叫做脉动直流电流，如图 1-6 b 所示。电流的大小和方向都不随时间变化的叫做恒定直流电流，如图 1-6 c 所示。电流为恒定直流时，式（1-4）可改写为：

$$I = \frac{Q}{t}$$

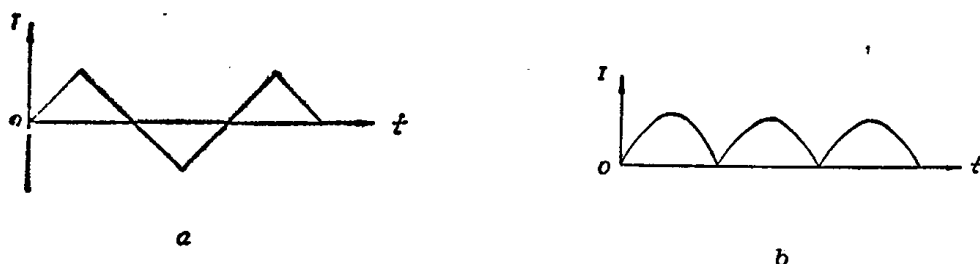


图 1-6 电流的种类

a—交流电流；b—脉动电流；c—恒定电流

二、电动势

如图 1-5 所示，在外电路闭合时，正电荷在电场力的作用下，从电源的正极经负载向负极定向移动。这样经一段时间后两极的电位就会相等。为了保持两极原有的电位差，在电源内部就必须有外力（电源力）来克服电场力对电荷的作用，将正电荷从负极送往正极，即将正电荷从低电位移向高电位，使电荷的电位能增加，增加的数值等于外力移送电荷所做的功。外力移送电荷所做的功 W 和被送电量之比叫做电源的电动势。用 E 表示

$$E = \frac{W}{Q} \quad (1-5)$$

电源电动势在数值上等于外力移送单位电量所做的功。对不同电源来说外力移送单位电量所做的功是不同的，所以电动势是衡量电源力作功能力的一个物理量。它的单位也是伏特。

电动势和电压的单位虽然相同，但二者的意义不同：前者是外力移动电荷做功，后者是电场力移动电荷做功；前者做功的结果将其他形式的能转变为电能，后者做功的结果使电能转变为其他形式的能；前者的方向规定为由低电位指向高电位，后者则规定由高电位指向低电位。

三、欧姆定律

电路中电流的大小可按欧姆定律计算。

对一段没有电源的电路：

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-6)$$

式中 I 为电路中的电流强度, U 为该段电路负载两端的电压, R 为负载的电阻是一常数, 这种电阻叫做线性电阻。如果电阻不是常数而是随着电压或电流的变动而变化, 这种电阻叫做非线性电阻; 非线性电阻两端的电压和通过它的电流不服从欧姆定律, 也不能用欧姆定律的数学表达式表达, 只能用函数图象来表示。非线性电阻将在电子技术中讨论, 本章着重介绍线性电阻中电流和它两端电压的关系。

对含有电源的全电路:

$$I = \frac{E}{r_0 + R} \quad (1-7)$$

式中 E 是电源的电动势, r_0 是电源的内电阻, R 是外路电阻。电阻的单位是欧姆。

式(1-7)还可改写为

$$E = Ir_0 + IR = Ir_0 + U \quad (1-8)$$

式中 U 是电源端电压, Ir_0 是电源内电阻的电压降。

式(1-8)是电路的电压平衡方程式, 从式中可知电源电动势等于其端电压加内电阻电压降。由于通常内电阻很小, 故端电压略小于电动势。当电流增大(外电阻减小), 内电压降增大, 端电压即减小; 外电路短路时(外电阻为零), 电流 I 达到最大值, 端电压为零; 电流减小时(外电阻增大), 内电压降减小, 端电压便增大; 外电路断路(外电阻无穷大), 电流为零, 电源端电压 U 就等于电源的电动势。

例 1-1 如图1-7, 已知 $E=12$ 伏, $r_0=0.1$ 欧, $R=3.9$ 欧。求: 电路中的电流, 电源内电压降, 电源的端电压; A 、 B 两点的电位那一点高? 电压和电流的方向如何?

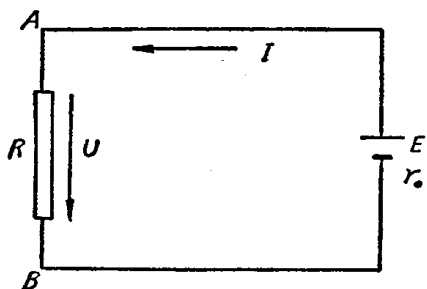


图 1-7 例1-1图

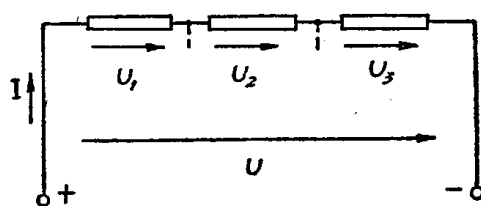


图 1-8 电阻串联电路

解

$$I = \frac{E}{r_0 + R} = \frac{12}{0.1 + 3.9} = 3 \text{ 安}$$

$$r_0 I = 0.1 \times 3 = 0.3 \text{ 伏}$$

$$U = E - r_0 I = 12 - 0.3 = 11.7 \text{ 伏}$$

因电流在外电路是从高电位到低电位, 故 A 点电位比 B 点电位高; 电压和电流的方向如图中箭头所示。

由于电源和负载的数目及其连接方式不同, 电路的形式有很多。物理中学过的串、并、混联电路是属于简单电路, 简单电路可用电阻的串、并联法则和欧姆定律来计算其电流。

图 1-8 是电阻串联电路, 在串联电路中, 各段电阻中通过同一电流, 串联电路的等值

电阻为各段电阻之和，各段电路上的电压降与各段电阻成正比，线路上总电压为各分电压之和。

图1-9是电阻并联电路。电路中联有三个或三个以上导线的点称做节点，如图中A、B两点，两点间的任一电路为支路。在并联电路中，各电阻两端都具有同一电压，其等值电阻的倒数是各支路电阻倒数之和，各支路中的电流与该支路的电阻成反比，线路的总电流是各支路中电流之和。设两节点间的电压不变，如果某一支路的电阻改变时，只改变该支路本身的电流和线路中的总电流，对其他支路并无影响。正是由于这个原因，所以通常负载总是并联后接于供电电源两端。

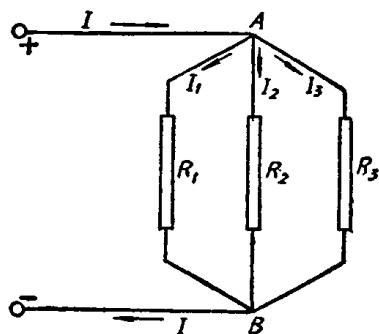


图 1-9 电阻的并联电路

如果电路中既有串联又有并联，则为混联电路，此种电路的一般计算步骤如下：

1. 利用电阻的串、并联法则，将电路简化为无分支电路，求出总的等值电阻；
2. 用欧姆定律求电路的总电流；
3. 求各段电路两端的电压；
4. 求各支路中的电流。

例 1-2 图1-10 是跃进汽车的转向灯和继电器的连接电路图。已知：前灯电阻 $R_1 = 24$ 欧，后灯电阻 $R_2 = 48$ 欧，转向指示灯电阻 $R_3 = 96$ 欧，继电器附加电阻 $R_4 = 10$ 欧，电源内电阻 $r_0 = \frac{2}{7}$ 欧，电动势 $E = 12$ 伏。求继电器附加电阻接入电路和未接入电路时前转向灯 R_1 中的电流？

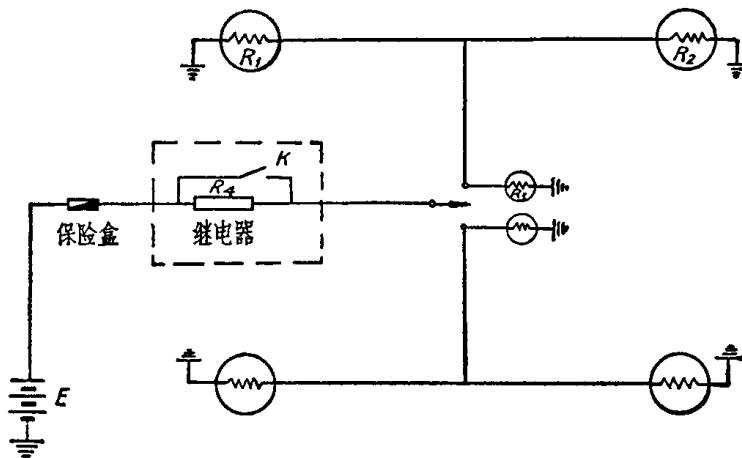


图 1-10 转向灯继电器电路

解 当 R_4 接入电路时总的等值电阻：

$$R = R_4 + R'$$

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{24} + \frac{1}{48} + \frac{1}{96} = \frac{7}{96}$$

$$R' = \frac{96}{7} \quad R = 10 + \frac{96}{7} = 23\frac{5}{7} \text{ 欧}$$

线路中的总电流

$$I = \frac{E}{r_0 + R} = \frac{12}{\frac{2}{7} + 23\frac{5}{7}} = \frac{12}{24} = 0.5 \text{ 安}$$

前转向灯两端的电压

$$U = IR' = 0.5 \times \frac{96}{7} \approx 7 \text{ 伏}$$

前转向灯中的电流

$$I = \frac{U}{R_1} = \frac{7}{24} \approx 0.29 \text{ 安}$$

当 R_4 未接入电路时电路的总电流

$$I = \frac{E}{r_0 + R'} = \frac{12}{\frac{2}{7} + \frac{96}{7}} = \frac{12}{14} = \frac{6}{7} \text{ 安}$$

前转向灯两端的电压

$$U = E - Ir_0 = 12 - \frac{6}{7} \times \frac{2}{7} \approx 11.83 \text{ 伏}$$

前转向灯中的电流

$$I = \frac{U}{R_1} = \frac{11.83}{24} \approx 0.493 \text{ 安}$$

同样方法可求后转向灯和转向指示灯中的电流。因继电器附加电阻接入电路和未接入电路时，转向灯中的电流不同，其亮度就不同，从而预告了汽车行驶的方向。

用电器如灯泡的电阻大小是由它自身电阻丝的长短、粗细和材料来决定的。根据测定，它们之间的关系如下：

当材料一定时，导体的电阻跟它的长度成正比，跟它的横截面积成反比，写成数学公式有：

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad \text{或} \quad R = \frac{l}{\gamma s} \quad (1-9)$$

式中 l 是导体的长度，单位是米。 s 是导体的截面积，单位是毫米²。 ρ 是电阻率，常用材料的电阻率见表1-1。电阻率的倒数 $\frac{1}{\rho} = \gamma$ ， γ 称做电导率。

常用材料的电阻率

表 1-1

材 料 名 称	银	铜	铝	钨	铁	镍铬丝	铁铬铝	碳
电阻率 $\frac{\text{欧姆} \cdot \text{毫米}^2}{\text{米}}$	0.016	0.0175	0.028	0.055	0.1	1.1	1.2	20

导体的电阻大小还与温度有关。金属导体的电阻随着温度的升高而增加；液体和碳的电阻随着温度的升高而下降；有的材料如锰铜、康铜等几乎不受温度的影响。电阻和温度的关系可用下式表示

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)]$$

式中 R_1 、 R_2 分别是温度为 t_1 、 t_2 时导体的电阻。 α 叫做电阻的温度系数，常用金属

材料的温度系数见表1-2。

常用金属材料的温度系数

表 1-2

材 料 名 称	银	铜	钨	铁	铂	康 铜	镍 铝	碳
$\alpha \left(\frac{1}{\text{度}} \right)$	0.0036	0.0043	0.0048	0.0057	0.0039	0.000004	0.00025	0.00002

在建筑机械上利用导体电阻随温度变化的这一性质来自动调节汽油发动机点火系的电流。当电流增大，温度升高，导体的电阻增大，使电流自动减小；当电流减小，温度降低，导体电阻减小，使电流自动增大。以保证点火线圈的电流值在适合工作的范围内。

在常温下导体总是具有一定电阻的。当温度降低电阻就减小，温度接近绝对零度时，导体的电阻减小到零。导体电阻减小到零的现象叫做超导电现象。超导电性是近代科学正在从事研究的课题，已经发现的锌、水银、铝、铅等金属具有超导电性，更多的发现有待于继续研究。

四、克希荷夫定律

前面我们所列举的电路，可以用欧姆定律来进行计算，有的电路却不能直接用欧姆定律来计算，如图 1-11 是运输、土方机械电气设备的电源系统电路图。当发动机高速运转时，发电机对蓄电池充电，此时蓄电池是在吸收电能，并把它转化成化学能，起着—个负载的作用。这时欲计算发电机的供电电流、对蓄电池的充电电流和用电器中的电流就得用克希荷夫定律来求解。

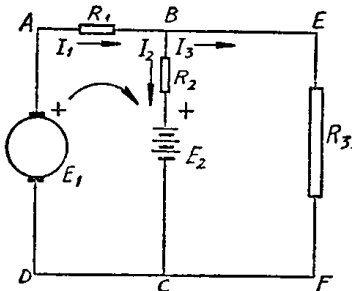


图 1-11 电源系电路

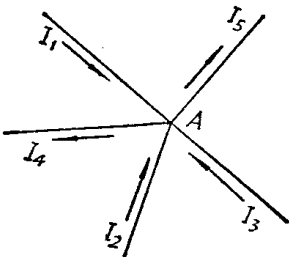


图 1-12 节点上的电流

(一) 克希荷夫第一定律 克希荷夫第一定律是说明电路中各支路电流之间的关系。

在电路内任何一节点，单位时间内流入该节点的电量等于流出的电量，而不能堆积电荷，也就是说流入某节点的电流之和等于流出该节点的电流之和。如图1-12中 I_1 、 I_2 、 I_3 流入节点A， I_4 、 I_5 从节点A流出，于是有：

$$\begin{aligned}
 I_1 + I_2 + I_3 &= I_4 + I_5 \\
 \text{或} \quad I_1 + I_2 + I_3 - I_4 - I_5 &= 0 \\
 \text{即} \quad \sum I &= 0 \quad (1-10)
 \end{aligned}$$

这就是克希荷夫第一定律的数学表达式，即流入任一节点电流的代数和等于零。流入该节点的电流为正，流出节点的电流为负。

(二) 克希荷夫第二定律 克希荷夫第二定律是说明任一闭合回路中电动势与各部分

电压之间的关系。

从电路中任一点出发，按任意方向沿某些支路环行一周后回到原来的位置，所形成的闭合路线叫做回路，环行的方向叫做回路的方向，如图1-11中的箭头所示。对回路ABCD来说，其电位差具有下列关系：

由A到B：

$$\varphi_A - \varphi_B = I_1 R_1$$

由B到C：

$$\varphi_B - \varphi_C = I_2 R_2 + E_2$$

由C到D：

$$\varphi_C - \varphi_D = 0$$

由D到A：

$$\varphi_D - \varphi_A = -E_1$$

将上列各式相加得：

$$0 = -E_1 + I_2 R_2 + E_2 + I_1 R_1$$

整理后得：

$$E_1 - E_2 = I_2 R_2 + I_1 R_1$$

其一般形式为

$$\sum E = \sum IR \quad (1-11)$$

这就是克希荷夫第二定律的数学表达式，即在电路的任一回路中电动势的代数和等于各电阻上电压降的代数和。

用克希荷夫第二定律列方程时，重要的问题是确定各电动势和电压降的正负。电动势和电压降的正负根据下述原则确定：先任意选定回路的方向，如果电动势的方向（在电源内部由负极到正极）与回路方向相同为正，反之为负。通过电阻的电流方向与回路方向一致其电压降为正，相反为负。

例 1-3 在图1-11中，如果发电机的电动势 $E_1 = 14$ 伏，蓄电池的电动势 $E_2 = 12$ 伏， $R_1 = 0.2$ 欧（导线电阻和发电机内阻之和）， $R_2 = 0.2$ 欧（导线电阻和蓄电池内阻之和）， $R_3 = 2.4$ 欧（负载电阻），求这时的充电电流、负载电流和发电机的供电电流各等于多少？

解 为了求出三个未知电流，必须列出三个方程式。电路中只有两个节点，利用克希荷夫第一定律只能写出一个方程（如果写两个方程，第二个方程与第一个方程相同没有意义）。有 n 个节点的电路利用第一定律只能列出 $n - 1$ 个方程。其余的方程可用第二定律写出。我们规定以顺时针方向为回路方向，各支路中的电流方向如图所示。

对节点B由第一定律可知：

$$I_1 = I_2 + I_3 \text{ —— ①}$$

对ABCD回路有：

$$E_1 - E_2 = I_1 R_1 + I_2 R_2 \text{ —— ②}$$

对BEFCB回路有：

$$E_2 = I_3 R_3 - I_2 R_2 \text{ —— ③}$$

把已知值代入方程②和③中得

$$14 - 12 = 0.2I_1 + 0.2I_2 \quad \text{---④}$$

$$12 = 2.4I_3 - 0.2I_2 \quad \text{---⑤}$$

解方程①、④和⑤得：

$$I_1 = 7.6 \text{ 安}$$

$$I_2 = 2.4 \text{ 安}$$

$$I_3 = 5.2 \text{ 安}$$

第三节 复杂电路的计算

上节已讲过的简单电路，是利用串、并联方法将较复杂的电路可化为简单电路，利用欧姆定律计算其支路电流。而有的电路则必须借助于克希荷夫定律来计算其支路电流。根据生产的要求，电路往往是多种多样的，其结构形式是各有特点的，计算复杂电路，千篇一律地利用上节讲过的解法，会出现方程多，运算手续繁杂的情况。因此我们必须根据电路的特点去分析、寻找计算电路的简便方法。本节将扼要地介绍几种常用的计算复杂电路的方法。

一、支路电流法

计算复杂电路的各种方法中，支路电流法是最基本的。上节已利用支路电流法对充电电路进行了分析和计算，本节就计算的方法和步骤归纳如下：

(一) 画出完整的电路图，并假设出每一支路的电流方向，和每一回路的回路方向。

(二) 利用克希荷夫第一定律列方程，电路有 n 个节点可列出 $n-1$ 个方程。

(三) 不足的方程数用克希荷夫第二定律来补充，电路有 m 个单孔回路只能列出 m 个独立的方程（但列方程时并不仅限于单孔回路）。

(四) 解方程组，求出各支路中的电流，如果电流值为负，说明原假设的电流方向和电流实际方向相反。

(五) 校验：最后利用未列方程的回路来检验答案是否正确。

例 1-4 在图 1-13 所示的桥式电路中，设 $E=12$ 伏， $R_1=R_2=5$ 欧， $R_3=10$ 欧， $R_4=5$ 欧。中间支路是一电流计，其电阻 $R_g=10$ 欧。试求电流计中的电流 I_g 。

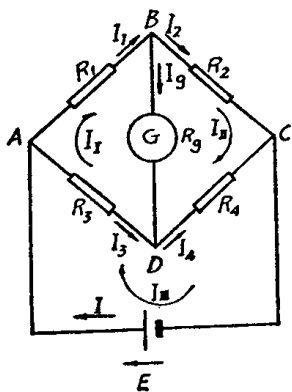


图 1-13 桥式电路

解 各支路中的电流方向如图所示，各回路的方向假设均取顺时针方向，在图中有四个节点，三个单孔回路，故可列出六个方程：

$$\text{对节点 A 有: } I - I_1 - I_3 = 0$$

$$\text{对节点 B 有: } I_1 - I_2 - I_g = 0$$

$$\text{对节点 C 有: } I_2 + I_4 - I = 0$$

$$\text{对回路 ABDA 有: } I_1 R_1 + I_g R_g - I_3 R_3 = 0$$

$$\text{对回路 BCDB 有: } I_2 R_2 - I_4 R_4 - I_g R_g = 0$$

$$\text{对回路 ADCA 有: } E = I_3 R_3 + I_4 R_4$$

解联立方程得：

$$I_g = \frac{E(R_2 R_3 - R_1 R_4)}{R_g(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2(R_3 + R_4) + R_3 R_4(R_1 + R_2)}$$

将已知数代入得,

$$I_g = 0.126 \text{ 安}$$

当 $I_g = 0$ 时叫做电桥平衡, 故电桥平衡的条件是 $R_2 R_3 - R_1 R_4 = 0$

即

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

二、回路电流法

从上例中我们看到, 利用支路电流法计算含有较多支路的复杂电路, 计算手续比较复杂, 含有六个支路就得解六元一次联立方程。

根据电路结构的特点, 我们如果假设三个单孔回路中的电流分别是 I_1 、 I_2 和 I_3 在三个回路中环流着, 其正方向如图1-13所示。这三个电流就称做回路电流, 显然, 六个支路电流和这三个回路电流有一定的关系: 在独立支路中, 支路电流就是回路电流 (如果二者方向相反则仅差一负号), 即:

$$I_1 = I_1$$

$$I_2 = I_2$$

$$I_3 = I_3$$

在公共支路中, 支路电流等于两个相邻回路电流的代数和 (回路电流和支路电流方向相同为正, 否则为负) 即:

$$I_3 = I_3 - I_1$$

$$I_4 = I_3 - I_2$$

$$I_g = I_1 - I_2$$

因此, 可先求出回路电流, 然后再由这些关系式就可求出支路电流来。这样, 未知数便由六个减为三个, 只解三元一次联立方程就可以了。

求回路电流时, 也是利用克希荷夫第二定律对各回路利用回路电流列出方程组, 然后求解。这种利用回路电流列方程, 先求回路电流的方法叫做回路电流法。如图1-13中三个回路电流方程是:

$$\text{对ABDA回路有 } (R_1 + R_g + R_3)I_1 - R_g I_2 - R_3 I_3 = 0$$

$$\text{对BCDB回路有 } (R_2 + R_4 + R_g)I_2 - R_4 I_3 - R_g I_1 = 0$$

$$\text{对ADCA回路有 } (R_3 + R_4)I_3 - R_3 I_1 - R_4 I_2 = E$$

解此三元一次联立方程得:

$$I_1 = 1 \frac{5}{19} \approx 1.263 \text{ 安}$$

$$I_2 = 1 \frac{13}{95} \approx 1.137 \text{ 安}$$

$$I_3 = 2 \frac{2}{95} \approx 2.02 \text{ 安}$$

再根据回路电流和支路电流的关系求得:

$$I_1 = I_1 = 1 \frac{5}{19} \approx 1.263 \text{ 安}$$

$$I_2 = I_2 = 1 \frac{13}{95} \approx 1.137 \text{ 安}$$

$$I = I_a = 2 \frac{2}{95} \approx 2.02 \text{ 安}$$

$$I_3 = I_a - I_1 = 2 \frac{2}{95} - 1 \frac{5}{19} = -\frac{72}{95} \approx -0.76 \text{ 安}$$

$$I_4 = I_a - I_2 = 2 \frac{2}{95} - 1 \frac{13}{95} = -\frac{84}{95} \approx -0.88 \text{ 安}$$

$$I_5 = I_1 - I_2 = 1 \frac{5}{19} - 1 \frac{13}{95} = \frac{12}{95} \approx 0.126 \text{ 安}$$

列方程时应注意：除考虑本回路的回路电流在回路各电阻上产生的电压降，即方程的第一项外，还要考虑到相邻回路电流在公共支路上产生的电压降，即方程中的后两项。相邻回路中的回路电流方向与该回路同方向产生的电压降为正，否则为负。

三、节点电压法

利用回路电流法解支路多、节点多的复杂电路比较简便，但对支路多、节点少的复杂电路，利用回路电流法求解并不简便，特别是具有两个节点多支路的复杂电路，因单孔回路多，所列方程数就相应的增多，求解就比较繁杂。对具有两节点多支路的复杂电路的计算，最好利用节点电压法，所谓节点电压法就是先求出两节点间的电压，然后再利用欧姆定律来求各支路中的电流。为了便于导出节点电压和电路中各物理量之间的关系，我们仍以图1-11的电路为例。在图1-11的电路中，B、C两点间的电压叫做节点电压，如果电压的正方向是由B指向C，各支路中的电流可用欧姆定律求得：

$$I_1 = \frac{E_1 - U}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{U - E_2}{R_2}$$

$$I_3 = \frac{U}{R_3}$$

根据克希荷夫第一定律

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

$$\frac{E_1 - U}{R_1} - \frac{U - E_2}{R_2} - \frac{U}{R_3} = 0$$

$$\frac{E_1}{R_1} - \frac{U}{R_1} - \frac{U}{R_2} + \frac{E_2}{R_2} - \frac{U}{R_3} = 0$$

$$\frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}$$

$$U = \frac{\frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{\sum \frac{E}{R}}{\sum \frac{1}{R}}$$

在式中分母各项总是正值；分子的各项可为正，也可为负。当电动势和节点间的电压方向相反时取正号，相同时取负号。

例 1-5 用节点电压法计算例1-3

解 先求节点间的电压

$$U = \frac{\frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{\frac{14}{0.2} + \frac{12}{0.2}}{\frac{1}{0.2} + \frac{1}{0.2} + \frac{1}{2.4}} = 12 \frac{12}{25} \text{ 伏}$$

$$I_1 = \frac{E_1 - U}{R_1} = \frac{14 - 12 \frac{12}{25}}{0.2} = 7.6 \text{ 安}$$

$$I_2 = \frac{U - E_2}{R_2} = \frac{12 \frac{12}{25} - 12}{0.2} = 2.4 \text{ 安}$$

$$I_3 = \frac{U}{R_3} = \frac{12 \frac{12}{25}}{2.4} = 5.2 \text{ 安}$$

如果只求负载 R_3 中的电流和支路电流法相比可以省去求 I_1 和 I_2 的不必要的计算。计算并联运行电路和不对称三相电路时常用此法。

四、迭加原理

迭加原理，不但可以用来计算复杂电路，而且是分析、计算线性问题的普遍原理，利用迭加原理可以将复杂电路简化为简单电路，计算简便，物理意义明确，便于理解。所谓迭加原理，就是把任一支路中的电流看成是电路的各个电动势单独存在时，在该支路中产生的各个电流的代数和。例如如图1-11负载 R_3 中的电流就可以看成是 E_1 和 E_2 单独存在时，在 R_3 中产生电流的代数和。即

$$I_3 = I'_3 + I''_3$$

如图1-14所示：

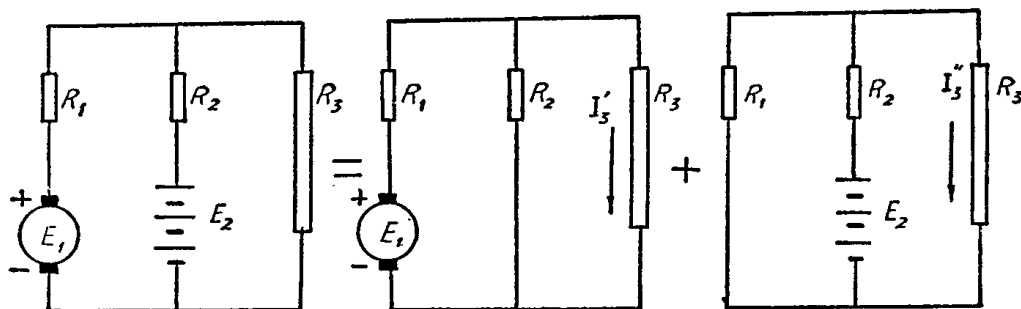


图 1-14 迭加原理

E_1 单独存在时，干路中的电流：

$$I' = \frac{E_1}{R_1 + R'} \quad R' = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$$

将具体数据代入得 $I' = 36.4$ 安；在支路 R_3 中的电流 $I'_3 = \frac{I' R'}{R_3} = 2.8$ 安

E_2 单独存在时，干路中的电流：

$$I'' = \frac{E_2}{R_2 + R''} \quad R'' = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}$$

将具体数据代入得 $I'' = 31.2$ (安)；在支路 R_3 中的电流